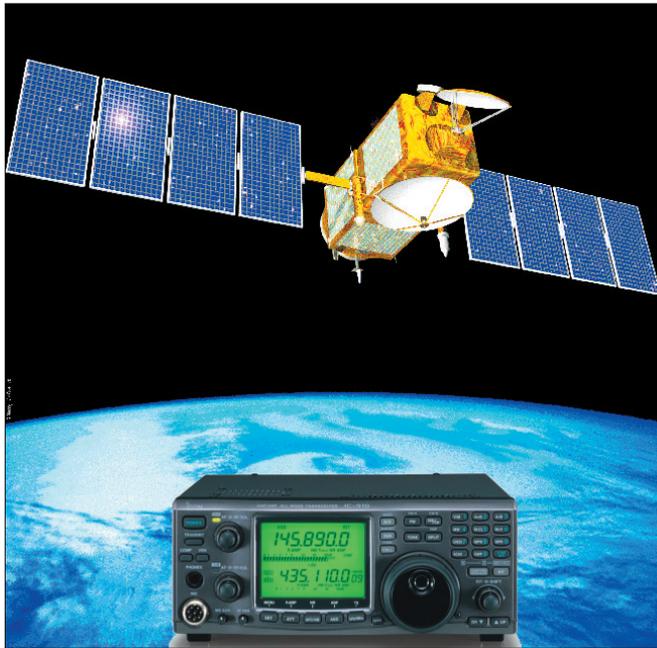


Comprendre l'effet Doppler dans les liaisons radio



Vous avez sûrement pris une fois le train. Non, pas dans la figure mais comme passager ! Si vous écoutez le bruit du train quand vous êtes à l'intérieur, vous percevez un bruit avec une sonorité toujours identique (en plus du tata-tatoum !).

Vous vous êtes aussi sûrement trouvé un jour bloqué à un passage à niveau SNCF pour laisser passer un train. Si vous écoutez le bruit du train sur tout son passage, vous percevez une sonorité différente en fonction de son déplacement. Lorsque le train approche, le niveau sonore augmente et la tonalité est élevée. À l'inverse, lorsque le train s'éloigne, le niveau sonore baisse et la tonalité diminue.

APPLICATION AU TRAFIC RADIO

Bien que les ondes sonores soient très différentes des ondes radio, le même phénomène

Dans les liaisons radio par satellite, les signaux sont affectés de ce que l'on appelle l'effet Doppler (ou, plus exactement, Doppler-Fizeau). Cet effet Doppler, du nom du physicien autrichien Christian Doppler (1803-1853) et confirmé pour les ondes électromagnétiques par Hippolyte Fizeau, est utilisé dans de nombreux domaines comme l'astronomie, les applications radiofréquences (radar...), médical, l'aviation, l'aéronautique, etc. Le but de cette présentation est de démystifier ce phénomène qui joue un rôle très important dans notre hobby.

s'exerce de la même façon. Ainsi, si on considère qu'un observateur fixe (l'opérateur, derrière sa station) reçoit un signal de fréquence F_0 en provenance d'une source en mouvement (le satellite) dont la fréquence est F_s , alors nous obtenons la relation :

$$F_s = F_0 - (V_r/c) \times F_0$$

où V_r est la vitesse relative du satellite et c la vitesse de la lumière soit 3×10^8 m/s.

Nous pouvons en déduire que le décalage en fréquence, soit l'effet Doppler, est égal à :

$$\Delta F = F_s - F_0 = -(V_r/c) \times F_0$$

- quand V_r est négative cela signifie que le satellite se rapproche de l'observateur fixe ;
- quand V_r est positive cela signifie que le satellite s'éloigne par rapport à l'observateur fixe ;
- lorsque le terme $[-(V_r/c) \times F_0]$

est nul cela signifie que le satellite est à la distance la plus courte de l'observateur à l'instant t .

Nous pouvons déduire la définition générale de l'effet Doppler :

L'effet Doppler correspond au changement de période (donc de fréquence, la fréquence étant l'inverse de la période) que subit un phénomène périodique quelconque (ondes radio, ondes sonores, ondes lumineuses, etc.) lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie.

DÉCALAGE DOPPLER ET TRANSPONDEURS SATELLITES

Nous avons vu, jusqu'à présent, l'effet Doppler appliqué à une seule fréquence. Or, dans le trafic amateur par satellites, nous utilisons des transpondeurs. Les transpondeurs ayant pour rôle de transposer un signal radio d'une bande

de fréquence sur une autre bande de fréquence différente. C'est pourquoi nous parlons de fréquence de montée (sens Terre/espace) et de fréquence de descente (sens espace/Terre). Nous avons donc deux fréquences à maîtriser avant de pouvoir corriger la dérive en fréquence lors d'une liaison. L'écart de fréquence engendré par l'effet Doppler peut être très important selon la bande utilisée. Le risque de trafiquer hors bande est important au fur et à mesure que vous vous rapprochez des limites du transpondeur. Il est donc impératif que les stations utilisatrices compensent le phénomène, nous verrons comment plus tard.

COMPENSATION DE L'EFFET DOPPLER EN PRATIQUE

Le meilleur moyen pour compenser l'effet Doppler lors d'une liaison radio par satellite consiste à piloter le transceiver en émission et en réception de manière automatique.

VOYONS LES BESOINS MATÉRIELS

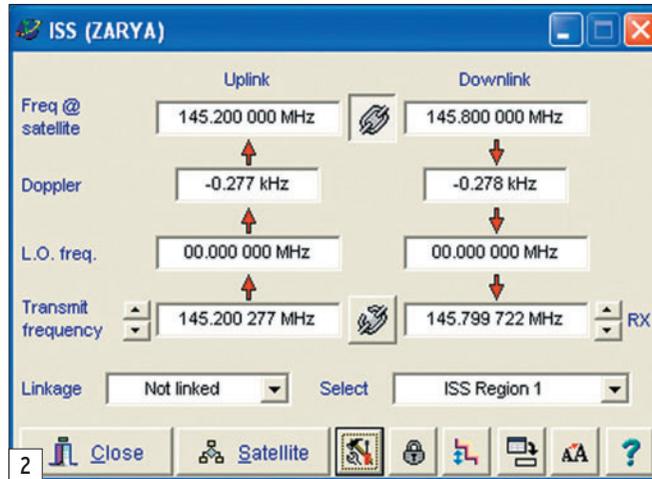
- TRX pilotable en RX et en TX simultanément.
- Ordinateur avec un port COM libre.
- Logiciel de poursuite interfaçable⁽¹⁾.
- Logiciel de CAT⁽²⁾ (Contrôle Automatique du Transceiver).

FONCTIONNEMENT SUCCINCT

Le logiciel de poursuite calcule la trajectoire du satellite. Les paramètres nécessaires au calcul de l'effet Doppler sont ainsi déterminés (distance par rapport à la station, vitesse relative du satellite...). Paramétrez la fonction de calcul du Doppler en fonction du trafic envisagé. Lancez le logiciel de contrôle de votre transceiver. Interfacez le logiciel de poursuite avec le

(1) Généralement, un lien DDE (Dynamic Data Exchange) permet d'interfacer deux logiciels afin qu'ils puissent échanger des données.

(2) Le logiciel CAT n'est pas nécessaire si le logiciel de poursuite possède déjà les fonctions nécessaires.



logiciel CAT (lien DDE actif). Le logiciel CAT doit commander le transceiver en fonction des données issues du logiciel de poursuite. Vous pouvez à présent réaliser une liaison.

Remarque : certains logiciels CAT possèdent une fonction de calcul de l'effet Doppler.

Personnellement, j'utilise le logiciel de poursuite "Nova for Windows" développé par NLSA (Northern Light Software Associates) et distribué par l'AMSAT-NA. Le logiciel CAT utilisé est TRX-Manager développé par Laurent F6DEX et interfaçable avec Nova for Windows. Le transceiver à gérer est un Icom IC-910H. L'interface CAT utilisée est une interface de construction personnelle que l'on peut voir sur la figure 1...

Le logiciel le plus complet est encore et toujours Instant Track. En installant les programmes résidents (TSR) supplémentaires, vous pouvez gérer vos moteurs d'antenne et votre transceiver.

La configuration des différents programmes est expliquée

dans un livret "Les outils d'Instant Track" disponible auprès de l'AMSAT France.

Il existe une multitude de programmes informatiques disponibles pour gérer les transceivers et le Doppler. Le choix d'un programme dépend du transceiver à commander et du système d'exploitation utilisé (DOS, Windows, Linux, Os pour Mac).

Citons les logiciels les plus utilisés :

- TRX Manager de Laurent Labourie F6DEX interfaçable avec NOVA, Wintrak Pro et Satscape (version complète à 69 €). www.trx-manager.com
- Ham Radio Deluxe par HB9DRV/PHIPH, interfaçable avec NOVA, WXtrack, Satscape (logiciel gratuit). www.ham-radio.ch/kits/HamRadioDeluxeVersion013b351.exe.
- WISPDDE de CX6DD, très utilisé est un logiciel gratuit qui s'interface entre votre logiciel de poursuite (WISP, Satscape, Station Program, SatPC32, etc.) et vos interfaces. Vous pouvez

télécharger la version 4.0 sur le site web de l'AMSAT soit directement sur le site de l'auteur :

www.laboratoriomederos.com/CX6DD/

La version 4.0 ne prend pas en charge certains transceivers comme l'IC-910 (même en modifiant par un transceiver équivalent). La version 4.2 est en cours de développement.

- Logiciel spécifique au FT-847 : FT-847 Super Control de DH1NGP (prix 75 €). www.supercontrol.de
- RadioCom 5.1 (Prix non communicable !). www.bonito.net/software/

UTILISATION AVEC UN TRANSVERTER OU UN CONVERTISSEUR DE RÉCEPTION

Les transceivers satellites sont généralement conçus pour les bandes 145 MHz et 435 MHz. À certains d'entre eux, il est possible d'ajouter une option 1200 MHz, mais si vous souhaitez utiliser une autre bande de fréquence, vous êtes alors obligé d'insérer dans votre ligne de transmission et de réception, une antenne adaptée à la bande de fréquence envisagée mais également un transverter pour l'émission et/ou un convertisseur pour la réception. Chacune de ces interfaces possède un oscillateur local (plus ou moins stable). Cet oscillateur est caractérisé par une fréquence d'oscillation qui, ajoutée ou soustraite à la bande de fréquence à utiliser, permet d'utiliser nos transceivers.

Comme nous l'avons vu précédemment, plus la fréquence de trafic est élevée, plus l'effet Doppler est important. Encore et plus que jamais, il est impératif de prendre en charge l'effet Doppler. Certains logiciels comme Nova for Windows permettent la prise en charge de ces interfaces. Pour cela, il est nécessaire de connaître la fréquence de l'OL. La fréquence de l'OL varie en fonction de nombreux paramètres comme la température du milieu ambiant,



SI VOUS AVEZ MANQUÉ CE NUMÉRO SPÉCIAL, vous pouvez le commander sur CD à :
SRC éditions - 1, tr. Boyer 13720 LA BOUILLADISSE
 Tél. : 04 42 62 35 99 - Fax : 04 42 62 35 36

l'environnement auquel il est soumis, la technologie employée, etc. Le décalage en fréquence est alors calculé par le logiciel en fonction de la valeur que vous aurez introduite (figure 2).

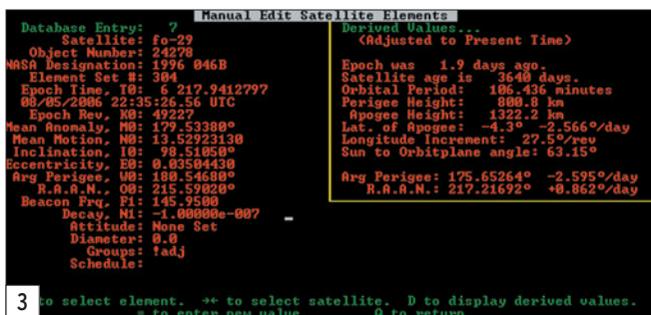
L'EFFET DOPPLER ET L'UTILISATION DES SATELLITES AMATEURS : LE TRAFIC EN PRATIQUE

L'objectif final est de réaliser des contacts radio par satellite le plus confortablement possible. C'est la raison pour laquelle il est impératif d'observer quelques règles de trafic. Pourquoi ? Parce que les stations avec lesquelles vous souhaitez entrer en contact ne sont pas soumises à la même dérive en fréquence que vous car l'effet Doppler est aussi fonction de la distance entre le satellite et la station utilisatrice (position géographique différente).

KB5MU, Paul Williamson, a écrit un article intitulé "La seule vraie règle pour le réglage de l'effet Doppler". Il décrit la manière que toutes les stations devraient appliquer pour utiliser de façon optimale la bande passante d'un transpondeur satellite. La "seule vraie règle" est de régler l'émetteur et le récepteur pour obtenir une fréquence constante au niveau du satellite.

ET SI VOTRE TRANSCIEVER NE POSSÈDE PAS LA FONCTION CAT ?

Il ne vous reste plus alors que la solution manuelle, en ajustant en permanence la fréquence d'émission ou de réception à l'aide du vernier du transceiver. La "coutume" chez beaucoup d'opérateurs est de ne compenser le décalage en fréquence que sur la fréquence la plus élevée (en émission ou en réception). L'expérience de l'opérateur est, dans ce cas, importante. À défaut, réalisez une courbe avec les valeurs Doppler au fur et à mesure de la progression du satellite. Il vous suffira alors de jeter un coup d'œil



3

UTC Date	Time	Azim/Elev	Range	f. fo-29	Lat	Long	Doppler	Freq/M	Offp
08Aug2006	0423	24/ 0	3649	60N	37E				212
08Aug2006	0424	27/ 3	3296	65N	33E		+2866	215	
08Aug2006	0425	32/ 6	2953	61N	30E		+2783	217	
08Aug2006	0426	37/ 9	2626	58N	28E		+2652	219	
08Aug2006	0427	44/ 14	2324	55N	26E		+2451	222	
08Aug2006	0428	53/ 18	2060	51N	25E		+2144	224	
08Aug2006	0429	65/ 21	1851	48N	23E		+1691	227	
08Aug2006	0430	80/ 24	1721	44N	22E		+1066	229	
08Aug2006	0431	97/ 24	1687	41N	20E		+723	231	
08Aug2006	0432	113/ 22	1757	37N	19E		-566	234	
08Aug2006	0433	127/ 18	1919	34N	18E		-1315	236	
08Aug2006	0434	138/ 14	2152	30N	17E		-1895	239	
08Aug2006	0435	146/ 10	2437	27N	16E		-2385	241	
08Aug2006	0436	152/ 6	2755	23N	15E		-2584	244	
08Aug2006	0437	157/ 2	3096	20N	15E		-2770	246	
end of pass									
08Aug2006	0600	8/ 0	3696	70N	18E		+3156	209	
08Aug2006	0609	6/ 3	3307	70N	13E		+3130	211	
08Aug2006	0610	4/ 7	2921	67N	9E		+3076	213	
08Aug2006	0611	2/ 11	2542	63N	5E		+2975	216	
08Aug2006	0612	358/ 17	2175	60N	3E		+2794	218	
08Aug2006	0613	352/ 23	1831	57N	1E		+8346	221	

4

UTC Date	Time	Azim/Elev	Range	f. fo-29	Lat	Long	Doppler	Freq/M	Offp
08Aug2006	0423	24/ 0	3649	60N	37E				212
08Aug2006	0424	27/ 3	3296	65N	33E		+8560	215	
08Aug2006	0425	32/ 6	2953	61N	30E		+8313	217	
08Aug2006	0426	37/ 9	2626	58N	28E		+7923	219	
08Aug2006	0427	44/ 14	2324	55N	26E		+7328	222	
08Aug2006	0428	53/ 18	2060	51N	25E		+6484	224	
08Aug2006	0429	65/ 21	1851	48N	23E		+5052	227	
08Aug2006	0430	80/ 24	1721	44N	22E		+3167	229	
08Aug2006	0431	97/ 24	1687	41N	20E		+814	231	
08Aug2006	0432	113/ 22	1757	37N	19E		-1690	234	
08Aug2006	0433	127/ 18	1919	34N	18E		-3929	236	
08Aug2006	0434	138/ 14	2152	30N	17E		-5660	239	
08Aug2006	0435	146/ 10	2437	27N	16E		-6895	241	
08Aug2006	0436	152/ 6	2755	23N	15E		-7718	244	
08Aug2006	0437	157/ 2	3096	20N	15E		-8273	246	
end of pass									
08Aug2006	0600	8/ 0	3696	70N	18E		+9427	209	
08Aug2006	0609	6/ 3	3307	70N	13E		+9351	211	
08Aug2006	0610	4/ 7	2921	67N	9E		+9188	213	
08Aug2006	0611	2/ 11	2542	63N	5E		+8885	216	
08Aug2006	0612	358/ 17	2175	60N	3E		+8346	218	
08Aug2006	0613	352/ 23	1831	57N	1E		+8346	221	

sur le tableau pour connaître approximativement la fréquence sur laquelle vous devrez vous trouver. En balayant la plage de fréquence encadrant la fréquence trouvée, vous devez retrouver le signal recherché.

Si vous utilisez un satellite mono-fréquence, comme les

PACSATS et certains satellites phonie FM tel SO-50, peut-être que votre transceiver est équipé de la fonction AFC (Automatic Frequency Compensation). Cette fonction permet de syntoniser automatiquement le récepteur sur un signal et de le suivre. À voir avec votre équipement...

5

Figure 6 – Relevé de mesures sur l'effet Doppler
SAT AO-7 27/06/2004 Durée : 1:14 min

Heure Locale	Doppler UP	Doppler DWN	Distance
23:06	145.950	435.950	
23:07	2658	7938	3136
23:08	2483	7412	2830
23:09	2234	6668	2555
23:10	1889	5636	2323
23:11	1425	4249	2147
23:12	838	2494	2044
23:13	161	470	2025
23:14	-533	-1603	2091
23:15	-1162	-3479	2235
23:16	-1673	-5004	2441
23:17	-2060	-6157	2695
23:18	-2339	-6989	2984
23:19	-2535	-7575	3296
23:20	-2671	-7979	3625

LA RÉALITÉ

À l'aide du logiciel Instant Track (encore lui !), lancez la poursuite du satellite que vous souhaitez visualiser, éditez les éléments képlériens en appuyant sur la touche "e". Déplacez le curseur jusqu'à la ligne "Beacon Frq" et tapez la fréquence que vous allez utiliser pendant le trafic, précédée du signe "=". Pour l'exemple qui suit (figure 3), j'ai choisi la fréquence centrale de FO-29 à savoir 145.950 MHz soit "=145.950" dans IT. La même manipulation sera à faire avec la fréquence 435.950 MHz pour pouvoir comparer les résultats obtenus.

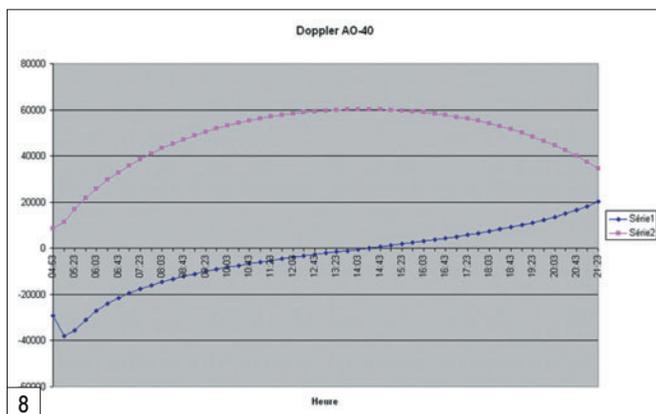
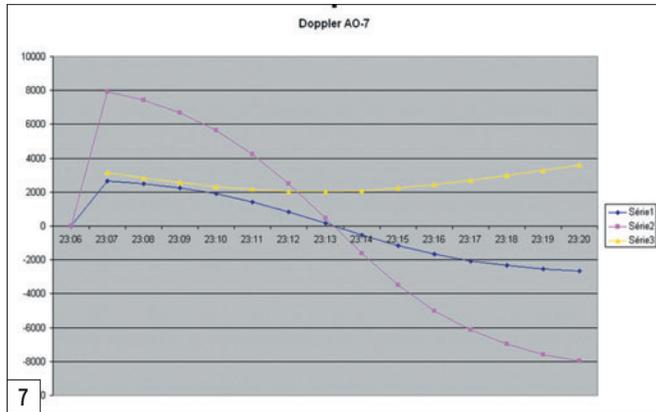
Validez et acceptez les modifications.

Pour observer les variations sur la fréquence entrée, dues à l'effet Doppler sur tout le passage de FO-29, j'ai réalisé une éphéméride.

Les éphémérides (figures 4 et 5) nous renseignent sur l'orientation des antennes, la distance du satellite par rapport à la station sol, la position géographique du satellite (Lat/Long) et sur la valeur du Doppler sur la fréquence entrée précédemment. Les valeurs calculées par Instant Track ont été reportées dans un tableau Excel (figure 6) plus pratique pour réaliser des courbes.

Les trois courbes dessinées sur la figure 7 sont en fonction du temps de la durée du passage. La courbe jaune représente la variation de la distance entre le satellite et la station sol, la courbe rouge représente le décalage en fréquence pour la fréquence 435.950 MHz, la courbe verte représente le décalage en fréquence pour la fréquence 145.950 MHz. A la vue de ces courbes, plusieurs conclusions s'imposent :

- Plus la fréquence augmente plus le décalage en fréquence s'accroît.
- Le décalage en fréquence est le plus faible lorsque la



distance station sol/satellite est la plus faible.

- Lorsque le satellite approche de la station sol, le Doppler est positif, il devient négatif lorsque le satellite s'éloigne.

Remarque : en trafic, il est tout à fait possible que l'effet Doppler double de valeur. C'est notamment le cas, quand vous contactez une station en fin de passage. Avec l'exemple ci-dessus, en fin de passage en VHF, le Doppler est de -2 671 Hz alors que le Doppler pour la station qui vient de voir le satellite apparaître au-dessus de son horizon est de +2 658 Hz environ, soit un écart de 5 329 Hz.

Le graphique de la figure 7 s'applique aux satellites naviguant sur les orbites basses.

Voyons à présent le cas des satellites naviguant sur les orbites elliptiques.

Jusqu'ici, nous avons vu que le Doppler était minimum lorsque le satellite était à la distance minimale avec la station sol. Observez le graphique de la figure 8 (obtenu à partir des données du tableau

en figure 9), réalisé pour un passage de AO-40 sur la fréquence de 2 400 MHz. Nous constatons que le Doppler affectant la fréquence est minimal voire nul lorsque AO-40 est le plus éloigné de la station sol de référence.

Pourquoi : cela provient essentiellement de la nature de l'orbite. En effet, lorsque le satellite arrive à son apogée (distance maximale entre le satellite et la Terre), vu de la Terre, le satellite apparaît quasiment immobile pour la station sol, avant de revenir vers la Terre rapidement. C'est durant cette partie de l'orbite que le Doppler est le moins important car sa vitesse est faible.

Remarque : nous constatons également que le Doppler atteint 38 kHz au début du passage alors que sur la bande 145 MHz le Doppler atteint 4 kHz au maximum. Le Doppler est bien proportionnel à la bande de fréquence utilisée.

CONCLUSION

Les applications de l'effet Doppler sont nombreuses que ce soit dans le domaine

médical, l'astronomie ou le spatial. Pour connaître sa position sur Terre, connaître la distance entre une sonde spatiale et la Terre, les systèmes de secours en mer (SARSAT) utilisent les techniques relatives à l'effet Doppler. Il est certain qu'une bonne maîtrise du Doppler est impérative avant de se lancer dans un QSO. J'espère seulement

vous avoir donné une idée plus précise sur le sujet.

SOURCES

- Satgen 212 et les suivants.
- Satellite Anthology ARRL.
- KB5MU "La vraie règle du Doppler".

Christophe CANDEBAT,
FIMOJ

Figure 9 – Relevé de mesures sur l'effet Doppler SAT AO-40 16/07/2004

Heure locale	Doppler UP	Distance	Heure locale	Doppler UP	Distance
04:53	-29335	8494	13:13	-1858	59790
05:03	-37906	11334	13:23	-1570	59908
05:13	-37598	14150	13:33	-1284	60004
05:23	-35466	16806	13:43	-999	60079
05:33	-33124	19287	13:53	-715	60133
05:43	-30931	21604	14:03	-431	60165
05:53	-28990	23775	14:13	-147	60176
06:03	-27181	25811	14:23	137	60166
06:13	-25589	27728	14:33	422	60134
06:23	-24150	29537	14:43	709	60081
06:33	-22841	31248	14:53	997	60006
06:43	-21644	32869	15:03	1288	59910
06:53	-20541	34407	15:13	1581	59791
07:03	-19521	35869	15:23	1877	59651
07:13	-18571	37260	15:33	2176	59488
07:23	-17684	38585	15:43	2479	59302
07:33	-16852	39847	15:53	2787	59093
07:43	-16068	41051	16:03	3099	58861
07:53	-15328	42199	16:13	3417	58605
08:03	-14628	43294	16:23	3740	58235
08:13	-13962	44340	16:33	4069	58020
08:23	-13329	45339	16:43	4405	57690
08:33	-12725	46292	16:53	4749	57335
08:43	-12147	47202	17:03	5100	56953
08:53	-11594	48070	17:13	5459	56544
09:03	-11063	48899	17:23	5827	56108
09:13	-10553	49689	17:33	6225	55641
09:23	-10063	50443	17:43	6592	55147
09:33	-9590	51161	17:53	6991	54624
09:43	-9133	51845	18:03	7401	54070
09:53	-8692	52496	18:13	7823	53484
10:03	-8265	53115	18:23	8258	52865
10:13	-7851	53703	18:33	8708	52213
10:23	-7450	54261	18:43	9172	51526
10:33	-7060	54790	18:53	9653	50803
10:43	-6681	55291	19:03	10151	50042
10:53	-6312	55763	19:13	10668	49243
11:03	-5952	56209	19:23	11205	48404
11:13	-5601	56629	19:33	11764	47523
11:23	-5258	57023	19:43	12346	46598
11:33	-4923	57391	19:53	12954	45628
11:43	-4616	57737	20:03	13590	44610
11:53	-4270	58057	20:13	14258	43542
12:03	-3953	58353	20:23	14958	42422
12:13	-3642	58626	20:33	15697	41246
12:23	-3335	58876	20:43	16477	40012
12:33	-3033	59103	20:53	17305	38716
12:43	-2735	59308	21:03	18184	37354
12:53	-2440	59490	21:13	19123	35921
13:03	-2147	59651	21:23	20130	34414